

РАСЧЕТ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ В КРИВОЙ Э.Д.С. УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники).

Одной из особенностей конструкции генератора ударной мощности является наличие пазов под успокоительную обмотку на большом зубце ротора. Являясь менее глубокими по сравнению с основными пазами, занятыми обмоткой возбуждения, эти пазы оказывают такое же влияние на проводимость воздушного зазора машины, как и основные пазы ротора [1, 2]. Благодаря этому выражение для проводимости зубцового слоя ротора при гладком статоре можно записать как

$$\lambda_p = \frac{1}{k_{\delta p}} - \sum_m (-1)^m \lambda_m \cos m z'_2 \frac{\pi}{\tau} x. \quad (1)$$

Аналогичное выражение имеет проводимость зубцового слоя статора при гладком роторе:

$$\lambda_c = \frac{1}{k_{\delta c}} - \sum_k (-1)^k \lambda_k \cos k z'_1 \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right), \quad (2)$$

где $k_{\delta p}$, $k_{\delta c}$ — коэффициенты воздушного зазора ротора и статора,
 z'_2 , z'_1 — число зубцовых делений ротора и статора,
 λ_m , λ_k — амплитуды гармоник проводимости зубцового слоя ротора и статора,
 m , k — показатели порядка гармоник проводимости ротора и статора,
 τ — полюсное деление машины,
 x — текущая координата.

Полную относительную проводимость воздушного зазора машины при двухсторонней зубчатости можно рассчитывать как произведение проводимостей зубцовых слоев каждой из сторон [3], тогда:

$$\begin{aligned} \lambda = & \frac{1}{k_{\delta}} - \frac{1}{k_{\delta p}} \sum_k (-1)^k \lambda_k \cos k z'_1 \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right) - \\ & - \frac{1}{k_{\delta c}} \sum_m (-1)^m \lambda_m \cos m z'_2 \frac{\pi}{\tau} x + \\ & + \sum_k \sum_m (-1)^{m+k} \lambda_k \lambda_m \cos k z'_1 \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right) \cos m z'_2 \frac{\pi}{\tau} x. \end{aligned} \quad (3)$$

Амплитуды проводимостей λ_k и λ_m применительно к асинхронным машинам, имеющим, как правило, полузакрытые пазы на стато-

ре и на роторе, определяются в виде произведения коэффициентов β и η_i [3], причем

$$\beta = \frac{B_0}{B_m} = f\left(\frac{b_n}{\delta}\right), \quad \eta_i = f\left(\frac{b_n}{t} \text{ и } \frac{t}{\delta}\right).$$

Значение коэффициентов β и η_i даны в виде кривых на рис. 1.

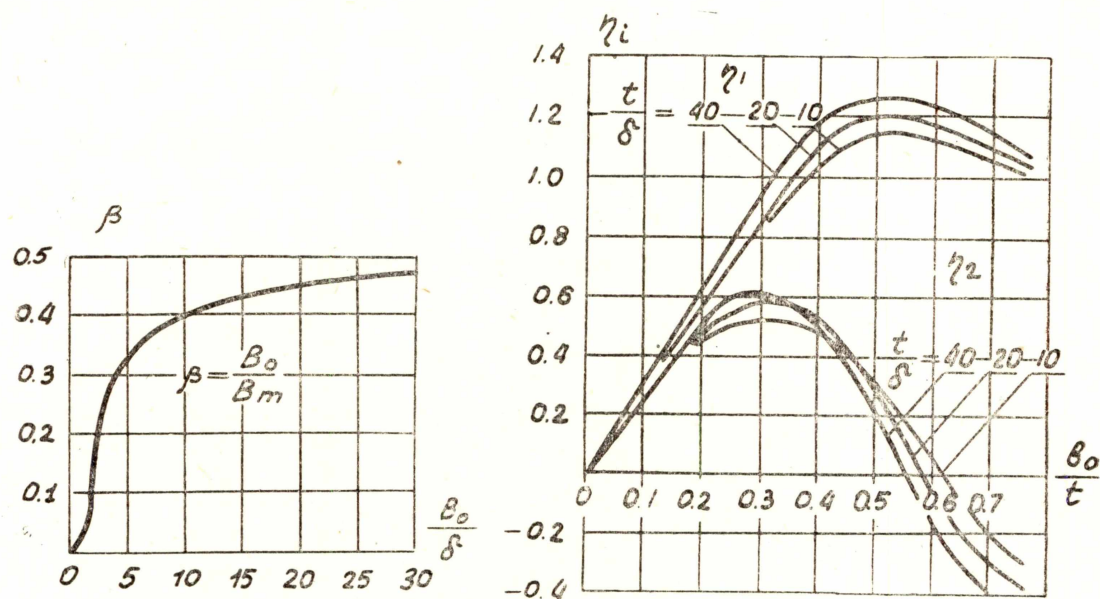


Рис. 1. К расчету амплитуд гармонических проводимостей зубцовых зон.

Так как ударные генераторы имеют преимущественно открытые пазы на статоре и на роторе, то для них расчет проводимостей λ_k и λ_m по указанной выше методике приводит к завышенным значениям э. д. с. зубцовых гармонических. В этом случае расчетные значения получаются более близкими к действительным, если в выражения, по которым определяются λ_k и λ_m , ввести коэффициент α , учитывающий уменьшение амплитуды зубцовых потоков одной стороны за счет наличия открытых пазов на другой стороне, тогда

$$\lambda_{k(m)} = \alpha \beta \eta_i. \quad (4)$$

При этом величина коэффициента α с достаточной степенью точности может быть принята равной $\frac{1}{k_\delta}$.

Поле в воздушном зазоре машины определяется по выражению

$$B = \frac{\Psi_0}{\delta} \lambda F, \quad (5)$$

где F — намагничивающая сила обмотки возбуждения,
 δ — величина одностороннего воздушного зазора машины.

В общем случае кривая намагничивающей силы ротора ударного генератора представляет из себя равнобедренную трапецию, симметричную относительно оси d полюсов. Разложение кривой н. с. в ряд дает:

$$F = \frac{4}{\pi} F_m \sum_i \frac{\sin i \gamma \frac{\pi}{2}}{i^2 \gamma \frac{\pi}{2}} \cos i \frac{\pi}{\tau} x, \quad (6)$$

где $F_m = I_b \omega_b$ — амплитуда намагничивающей силы обмотки возбуждения,

i — порядок пространственной гармоники намагничивающей силы.

Результирующее поле машины можно рассматривать как совокупность пространственных гармонических намагничивающей силы, неподвижных относительно оси ротора d и вращающихся вместе с ротором. Интегрирование выражения (5) с учетом (3) и (6) в пределах от $-\frac{\tau}{2}$ до $+\frac{\tau}{2}$ дает величину потока ротора на единицу длины машины.

$$\Phi = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} B dx = \frac{8 \mu_0 F_m}{\pi^2 \delta \gamma} \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i \gamma \frac{\pi}{2} \cdot \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} \lambda \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot dx. \quad (7)$$

Рассмотрим отдельные составляющие общего потока, полученные после интегрирования выражения (7).

1. Основной поток машины — результат взаимодействия н. с. обмотки возбуждения с проводимостью приведенного воздушного зазора, то есть поток за счет пространственных гармонических поля обмотки возбуждения при бесконечно узких прорезях пазов статора и ротора:

$$\Phi_0 = \frac{8 \mu_0 F_m}{\pi^2 \delta k_\delta \gamma} \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i \gamma \frac{\pi}{2} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot dx.$$

Отсюда поток i -той пространственной гармоники машины

$$\Phi_i = \frac{16}{\pi^3} \frac{\tau}{\gamma} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} F_m \frac{1}{i^3} \sin i \gamma \frac{\pi}{2} \sin i \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

и, в частности, поток первой гармоники

$$\Phi_1 = \frac{16}{\pi^3} \frac{\tau}{\gamma} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} F_m \sin \gamma \frac{\pi}{2}.$$

Выражая потоки i -тых пространственных гармонических через поток первой гармоники, получаем

$$\Phi_i = \Phi_1 \frac{1}{i^3} \frac{\sin i \gamma \frac{\pi}{2}}{\sin \gamma \frac{\pi}{2}} \sin i \frac{\pi}{2}.$$

Если обозначить через

$$B_{mi} = \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} F_{bi}, \quad F_{bi} = \frac{8}{\pi^2 i^2} k_{pi} F_m, \quad k_{pi} = \frac{\sin i \gamma \frac{\pi}{2}}{\gamma \sin i \frac{\pi}{2}},$$

то выражение (8) для i -той гармоники получим в том виде, в каком его обычно приводят в учебниках:

$$\Phi_i = \frac{2}{\pi} \tau l \frac{1}{i} B_{mi}.$$

2. Зубцовые потоки—результат взаимодействия н.с. обмотки возбуждения с проводимостью зубцовых слоев реального воздушного зазора, то есть потоки, связанные с проводимостью зубцового слоя ротора $\Phi_{z'_2}$ и зубцового слоя статора $\Phi_{z'_1}$:

$$\Phi_{z'_2} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} \frac{F_m}{\gamma} k_{\delta p} \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i\gamma \frac{\pi}{2} \times \\ \times \sum_m \lambda_m (-1)^{m+1} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} \cos mz'_2 \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot dx, \quad (9)$$

$$\Phi_{z'_1} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} \frac{F_m}{\gamma} k_{\delta c} \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i\gamma \frac{\pi}{2} \times \\ \times \sum_k \lambda_k (-1)^{k+1} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos kz'_1 \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right) \cdot dx. \quad (10)$$

Отсюда поток какой-либо гармонической за счет m -го порядка проводимости зубцового слоя ротора и i -той гармоники н.с. будет

$$\Phi_{\nu m} = \frac{1}{2} \Phi_i k_{\delta p} \lambda_m (-1)^{m+1} \left[\frac{i}{i - mz'_2} \frac{\sin (i - mz'_2) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} + \right. \\ \left. + \frac{i}{i + mz'_2} \frac{\sin (i + mz'_2) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} \right], \quad (11)$$

а поток ν -той гармонической за счет k -того порядка проводимости зубцового слоя статора i -той гармоники н.с. равен:

$$\Phi_{\nu k} = \frac{1}{2} \Phi_i k_{\delta c} \lambda_k (-1)^{k+1} \left[\frac{i}{i - kz'_1} \frac{\sin (i - kz'_1) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} + \right. \\ \left. + \frac{i}{i + kz'_1} \frac{\sin (i + kz'_1) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} \right] \cos kz'_1 \omega t. \quad (12)$$

Следует отметить, что за счет гармоник проводимости зубцового слоя ротора получаем гармоники потока неподвижные относительно оси d ротора, то есть вращающиеся синхронно с ротором. Из всех гармоник, связанных с зубчатостью ротора, наиболее значительными являются гармонические, полученные от первой гармоники н.с. Номер этих гармонических, которые принято называть зубцовыми, равен

$$\nu_m = 1 \mp mz'_2.$$

Из зубцовых гармонических наибольшую амплитуду имеют гармонические первого порядка $m=1$. В этом случае

$$\nu_m = 1 \mp z'_2.$$

При наличии в поле н. с. обмотки возбуждения сильно выраженных гармонических третьего, пятого, седьмого и др. порядков появляются потоки гармонических:

$$3 \mp mz'_2, 5 \mp mz'_2 \quad \text{и т. д.}$$

За счет гармонических проводимости зубцового слоя статора, вращающихся относительно оси d ротора с угловой частотой $\omega kz'_1$, создаются гармонические потока $\Phi_{z'_1}$. Из всех гармонических этого потока наиболее опасными являются гармонические от первой гармоники н. с. $i=1$, которые принято называть зубцовыми. Номер их равен

$$\nu_k = 1 \mp kz'_1.$$

Наибольшую амплитуду имеют гармонические за счет проводимости первого порядка $k=1$. В этом случае

$$\nu_k = 1 \mp z'_1.$$

При наличии в кривой н. с. значительных гармонических третьего, пятого и др. порядков следует рассматривать также потоки гармонических:

$$3 \mp kz'_1, 5 \mp kz'_1 \quad \text{и т. д.}$$

При наличии успокоительной системы на роторе следует учитывать ее демпфирующее действие. В [4] приводится коэффициент демпфирования высших гармонических потока $\Phi_{z'_1}$ успокоительной обмоткой:

$$D_\nu = 1 - \frac{j_{2\nu}^2 f_{ск\nu}^2}{1 + \sigma_{2\nu}}, \quad (13)$$

где $f_{2\nu}$ — обмоточный коэффициент ν -той гармоники,

$f_{ск\nu}$ — коэффициент скоса пазов,

$\sigma_{2\nu}$ — коэффициент рассеяния ротора.

Величину $\sigma_{2\nu}$ можно принять равной нулю, тогда при $f_{ск\nu} = 1$

$$D_\nu = 1 - f_{2\nu}^2,$$

где

$$f_{2\nu} = \frac{\sin \nu \frac{\pi p}{z'_2}}{\nu \frac{\pi p}{z'_2}}.$$

Зависимость $D_\nu = f\left(\frac{\nu p}{z'_2}\right)$ представлена на

рис. 2, откуда следует, что низшие гармонические почти полностью демпфируются успокоительной обмоткой. Гармонические, номер которых близок к числу зубцов ротора, практически не демпфируются. Экспериментальные данные, приведенные в табл. 2, подтверждают, что в кривой э. д. с. обмотки статора имеются явно выраженные зубцовые гармонические с номерами $1 \mp z'_1$.

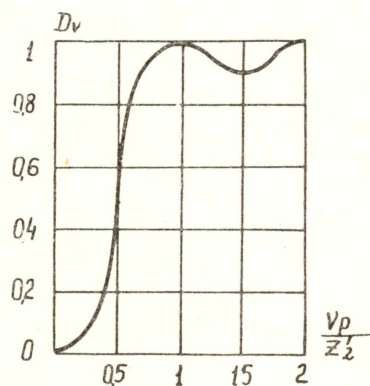


Рис. 2. Зависимость коэффициента демпфирования высших гармонических от соотношения между номером гармоники и числом демпферных стержней ротора.

3. Поток, связанный с проводимостью зубцовых зон статора, ротора и н. с. обмотки возбуждения

$$\Phi_{z'_1 z'_2} = \frac{8}{\pi^2} \frac{p_0}{\delta k_\delta} \frac{F_m}{\gamma} k_\delta \sum_i \frac{1}{i^2} \sin i\gamma \frac{\pi}{2} \sum_k \sum_m (-1)^{k+m} \lambda_k \lambda_m \times$$

$$+ \frac{\tau}{2} \times \cos kz'_1 \omega t \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \cos i \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos mz'_2 \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos kz'_1 \frac{\pi}{\tau} x \cdot dx. \quad (14)$$

Откуда поток какой-либо одной гармонической за счет k -того и m -го порядков проводимостей зубцовых слоев статора, ротора и i -той гармоники н. с. будет равен

$$\Phi_{\nu km} = \frac{1}{4} \Phi_i k_\delta \lambda_k \lambda_m (-1)^{k+m} \left[\frac{i}{i \pm kz'_1 \mp mz'_2} \frac{\sin (i \pm kz'_1 \mp mz'_2) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} + \right.$$

$$\left. + \frac{i}{i \pm kz'_1 \pm mz'_2} \frac{\sin (i \pm kz'_1 \pm mz'_2) \frac{\pi}{2}}{\sin i \frac{\pi}{2}} \right] \cos kz'_1 \omega t. \quad (15)$$

Из всего спектра частот потока $\Phi_{\nu km}$ играют некоторую роль только разностные гармонические, частота которых равна:

$$\nu_{km} = i \pm (kz'_1 - mz'_2).$$

При наличии успокоительной обмотки на роторе эти потоки будут в сильной степени демпфированы, поэтому потоками $\Phi_{\nu km}$ практически можно пренебречь.

Таблица 1

z'_2	b_{n2}	t_2	γ	$\beta_{(p)}$	$\eta_{1(p)}$	$\beta_{(c)}$	$\eta_{1(c)}$	$k_{\delta p}$	$k_{\delta c}$
20	6,5	16,1	0,70	0,42	1,20	0,31	0,65	1,43	1,15
26	6,0	12,4	0,69	0,41	1,15	0,31	0,65	1,52	1,15
28	6,5	11,5	0,71	0,42	1,20	0,31	0,65	1,75	1,15

По изложенной методике были рассчитаны потоки и наводимые ими э.д.с. в витке с диаметральной шагом, расположенном на статоре.

Таблица 2

ν	$z'_2 = 20$		$z'_2 = 26$		$z'_2 = 28$	
	Расчет	Экспер.	Расчет	Экспер.	Расчет	Экспер.
19	31,5	34				
21	31,5	30,8				
23			8,3	6,25	5,45	3,00
25			39,9	40,5	7,40	4,00
27			32,1	31,3	38,1	36,3
29					38,1	34,5

Расчеты проведены для машины со статором, имеющим 24 полузакрытых паза с открытием 3 мм и зубцовым шагом 13,6 мм, и комплектом роторов с числами зубцовых делений 20, 26 и 28. Геометрические параметры зубцовых зон ротора и расчетные коэффициенты представлены в табл. 1. Результаты расчета зубцовых гармонических и экспериментальные данные приведены в табл. 2. Как следует из табл. 2, совпадение расчетных данных с экспериментом удовлетворительное.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. О высших гармонических в кривой э. д. с. ударного генератора. Межвузовский сборник трудов, вып. 3. Вопросы теории и проектирования электрических машин, Новосибирск, 1963.
 2. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. К выбору обмотки ротора ударного генератора. Известия ТПИ, т. 138, 1965.
 3. А. И. Вольдек. Влияние неравномерности воздушного зазора на магнитное поле асинхронной машины. Электричество, № 12, 1951.
 4. Т. Г. Сорокер. Дифференциальное рассеяние многофазных синхронных электродвигателей. ВЭП № 6, 1956.
-